

УДК 620.191.33

## ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

*А.М. Сиротюк\*, О.В. Капшій, І.М. Дмитрах, Б.П. Русин, О.Л. Білий*

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060,  
м. Львів, тел. (032) 2631400; \*e-mail: [syrotiuk@ipm.lviv.ua](mailto:syrotiuk@ipm.lviv.ua)*

*Наведено опис інтерфейсу та особливостей роботи із розробленою експертною системою оцінювання ризику руйнування конструктивних елементів теплоенергетичної системи. Система призначена для встановлення роботоздатності та розрахунку залишкової довговічності експлуатованих елементів трубопроводів, визначення термінів їх безаварійної роботи між двома черговими профілактичними оглядами, а також для аналізу причин їх руйнувань. Система побудована у вигляді комп'ютерної програми із зручним для кінцевого користувача інтерфейсом. Система містить реляційну базу даних і включає в себе блок визначення геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів, які у трубопроводі моделюються півеліптичними тріщинами з різними співвідношеннями півосей. Для будь-якого вибраного конструктивного елемента трубопроводу оцінювання дефектів може бути здійснено за різними критеріями. При цьому змінними можуть бути фактичний стан металу на даному трубопроводі, реальний склад робочого середовища, геометричні розміри конструктивного елемента, специфіка експлуатаційних навантажень, форма тріщиноподібного дефекту. При визначенні допустимих розмірів дефектів враховується також і планований термін експлуатації елемента трубопроводу.*

*Ключові слова: конструкційна сталь, трубопровід, тріщиноподібний дефект, допустимий розмір дефекту, ризик руйнування.*

*Приведено описание интерфейса и особенностей работы разработанной экспертной системы оценки риска разрушения конструктивных элементов теплоэнергетической системы. Система предназначена для определения работоспособности и расчета остаточной долговечности эксплуатируемых элементов трубопроводов, определения сроков их безаварийной работы между двумя очередными профилактическими осмотрами, а также для анализа причин их разрушений. Система построена в виде компьютерной программы с удобным для конечного пользователя интерфейсом. Система содержит реляционную базу данных и включает в себя блок определения геометрических параметров трещиноподобных дефектов, выявленных средствами неразрушающего контроля и моделируемых полуэллиптическими трещинами с различным соотношением полуосей. Для любого выбранного конструктивного элемента трубопровода оценка дефектов может быть осуществлена разными критериями. При этом переменными могут быть фактическое состояние металла на данном трубопроводе, реальный состав рабочей среды, геометрические размеры конструктивного элемента, специфика эксплуатационных нагрузок, форма трещиноподобного дефекта. При определении допустимых размеров дефектов учитывается также и планируемый срок эксплуатации элемента трубопровода.*

*Ключевые слова: конструкционная сталь, трубопровод, трещиноподобны дефект, допустимый размер дефекта, риск разрушения.*

*An interface description and a specificity of work with developed expert system for fracture risk assessment of HPP structural elements are presented. The system is destined for determination of workability and calculation of residual durability of the exploited elements of pipelines, determination of terms of their trouble-free operation between two regular maintenance inspections and for analysis of fracture sources. The system is built as software with convenient for end user interface. The system contains a relational database, and contains the unit for determination of the geometric parameters of crack-like defects detected. Such defects are modeled by semielliptical cracks with different ration of semi-axes. For any chosen structural elements the defects danger estimation can be realized according to defferent criterion. The estimation will be based on following variables: actual state of metal on the given pipeline, real composition of operating environment, geometric dimensions of structural element, specificity of operation*

*loadings, shape of crack-like defect. The planned term of pipeline element maintenance is also taken into account during acceptable defects size determination.*

*Keywords: structural steel, pipeline, crack-like defect, admissible size of defect, risk of fracture.*

## Вступ

Основною метою оцінювання технічного стану теплоенергетичного устаткування теплоенергетичних систем (ТЕС) є одержання даних, що слугуватимуть основою для прийняття рішення про продовження терміну його експлуатації. Останнє вимагає врахування фактичних умов експлуатації об'єктів, а також виконання обов'язкових умов експлуатації на продовжуваний період [1].

Слід відзначити, що основне термомеханічне енергетичне устаткування (котли і трубопроводи для роботи на парі високих і надкритичних параметрів) було запроектоване на термін експлуатації 100 тис. год. при роботі у базовому режимі. Наприклад, посудини, що працюють під тиском і теплообмінні апарати проектувались на термін експлуатації від 10 до 30 років. Котли промислової енергетики, як правило, мали проектний термін експлуатації 20 років. Однак реальний термін експлуатації значної частини цього устаткування вже перевищений і складає 150–250 тис. год. При цьому значна частина обладнання працювала та продовжує працювати в маневреному режимі, хоча і була спроектована для експлуатації у базових режимах.

Стосовно котлів, посудин і трубопроводів, що працюють під тиском, часто використовується узагальнений термін – об'єкти котлоагрегату. Для них основною характеристикою є поняття безпеки. Безпека – це властивість об'єктів, що полягає у зведенні до мінімуму, при нормальній експлуатації і у випадках аварій, шкідливого впливу на обслуговуючий персонал, населення, обладнання та будівельні конструкції, а також у попередженні негативного впливу на навколишнє середовище. Її не слід плутати з поняттям надійності. Надійність – це властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи при цьому свої експлуатаційні показники впродовж певного часу. За своєю суттю поняття безпеки ширше за поняття надійності [2–4].

Надійність об'єктів котлоагрегату забезпечується технічним рівнем проекту, використанням високоякісних матеріалів і напівфабрикатів, застосуванням досконалих технологій виготовлення і монтажу, строгим дотриманням проектних умов експлуатації, потрібною якістю ремонтних робіт, а також

системою контролю за металом і зварними з'єднаннями у процесі експлуатації. Ці ж показники визначають і допустимий ресурс надійної експлуатації. У багатьох випадках, завдяки конструктивним рішенням та закладеним фактичним запасам міцності, об'єкти котлоагрегату допускають надійну експлуатацію і після завершення проектного терміну експлуатації.

На даний момент розроблена система нормативно-технічних документів, що визначають порядок, об'єм, періодичність і методи контролю металу та зварних з'єднань елементів об'єктів котлоагрегату [5–7]. Вона містить пакет документів, в яких сформульовано детальні вимоги до персоналу, що проводить контроль, приладів і регламентовано критерії браку. Ця нормативно-технічна документація розповсюджується як на період експлуатації обладнання, що передбачений проектом, так і за його межами.

Розроблена система документів передбачає, в основному, візуальний, геометричний і неруйнівний дефектоскопічний контроль за збереженням геометричних форм і розмірів обладнання, відсутністю у ньому ознак корозійного та ерозійного зношення, зокрема тріщин. Обладнання вважається придатним для подальшої експлуатації, якщо за результатами контролю не виявлено відхилень від вимог діючих правил і нормативно-технічних документів.

При проектуванні об'єктів котлоагрегату розрахунок на міцність здійснюється за нормами, в яких регламентуються геометрична форма, допустимі напруження та нормативні добавки до товщини стінки, що враховують технологічні допуски при виготовленні обладнання і трубопроводів та їх пошкодження внаслідок дії корозії та ерозії. Ці нормативи з часом змінювались. Так, стосовно котлів і трубопроводів, в період з 1950 р. до сьогоднішнього дня норми розрахунку на міцність змінювались 6 разів. Це було обумовлено вдосконаленням знань про механічні властивості сталей, умови міцності елементів, накопиченням банку даних стосовно зміни механічних властивостей сталей у різних робочих середовищах та режимах експлуатації, прагненнями до зниження металоємності. Змінювались не тільки регламентовані формули та допустимі напруження, але і підходи до вибору розрахункової температури стінки і

робочого тиску. Тому елементи обладнання і трубопроводів, що працюють в однакових умовах, але виготовлені в різний час згідно діючих на момент їх проектування нормативних матеріалів, мають різну товщину і відрізняються фактичним запасом міцності. Це зумовило істотний розкид допустимих значень ресурсу обладнання і трубопроводів, що експлуатуються в ідентичних умовах та мають однаковий проектний термін експлуатації. Особливо великі відмінності спостерігаються для елементів, які працюють при високих температурах в умовах повзучості металу.

#### Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Аналіз експлуатаційних пошкоджень конструктивних елементів трубопроводів різного призначення [8, 9] показує, що основними характерними особливостями процесів їх розвитку є, по-перше, певна локалізація, яка залежить від особливостей стану металевої поверхні, а, по-друге, їх стадійність.

Початкова локалізація процесу руйнування спричинена існуванням на поверхні металу певних неоднорідностей чи включень, що приводить до утворення локальних корозійно-активних ділянок. Наслідком цього є утворення корозійно-механічних пітингів та виразок, які слід розглядати як потенційні концентратори напружень. Вирішальна роль на цьому початковому етапі корозійного руйнування відводиться електрохімічним процесам, що активуються механічними напруженнями. Другий етап руйнування матеріалу характеризується утворенням від вже існуючих пітингів перших тріщиноподібних дефектів, так званих фізично коротких тріщин – тріщин, довжина яких, практично, не перевищує віддалі між головними мікроструктурними бар'єрами. На цьому етапі процесу корозійного руйнування зростає роль механічного фактора. Подальший перебіг процесу корозійно-механічного руйнування приводить до розвитку та злиття мікротріщин, після чого настає формування макротріщини, яка розвивається переважно в глибину матеріалу. Досягнення нею критичних розмірів приводить до спонтанного катастрофічного руйнування елемента конструкції.

Слід зауважити, що для конкретного конструктивного елемента, залежно від його геометричних розмірів та умов експлуатації, властива своя лімітуюча стадія процесу корозійно-механічного руйнування [10–13]. Наприклад, для тонкостінних трубопроводів стадії утворення корозійно-механічних виразок та зародження макротріщини будуть

визначальними з точки зору оцінювання їх роботоздатності та довговічності. Водночас для труб із товщиною стінки в декілька десятків міліметрів (наприклад, трубопроводи живильної води енергоблоків ТЕС) стадія розвитку макротріщини в глибину матеріалу буде визначати їх залишкову довговічність [14].

Саме тому для розроблення експертної системи технічної діагностики роботоздатності конструктивних елементів трубопроводів необхідні методи оцінювання корозійно-механічної пошкоджуваності металу для кожної із зазначених стадій процесу руйнування матеріалу. Дані про експлуатаційні пошкодження конструктивних елементів трубопроводів [11] вказують на необхідність обов'язкового розгляду та оцінювання наступних стадій, процесів і параметрів:

- розвитку корозійно-механічних пітингів та виразок,
- поверхневого корозійно-втомного тріщиноутворення,
- зародження макротріщини біля концентраторів напружень в умовах корозійної втоми,
- допустимої глибини тріщиноподібних дефектів.

Опис та аналіз фізичних засад цих процесів, а також розроблених експериментально-аналітичних методів їх оцінювання викладено в роботах [9, 15]. Базисом вказаного експериментально-розрахункового оцінювання була лабораторна діагностика фактичного стану металу, який у процесі довготривалої експлуатації суттєво змінює свої механічні, фізико-хімічні та інші властивості. Для цього було виконано комплекс фізико-хімічних та механічних досліджень експлуатованого металу, одержаного із реальних трубопроводів різного призначення.

У роботах [1, 6–9, 11] показано, що надійне прогнозування безпечних термінів роботи конструктивних елементів, які містять тріщиноподібні дефекти, вимагає урахування конкретних особливостей кожного розглядуваного випадку. Тобто базовими чинниками будуть: фактичний стан металу на даному трубопроводі, реальний склад робочого середовища, геометричні розміри конструктивного елемента, специфіка експлуатаційних навантажень, форма тріщиноподібного дефекту.

**Метою даної роботи** є опис інтерфейсу та особливостей роботи із розробленою експертною системою оцінювання ризику руйнування конструктивних елементів трубопроводів ТЕС.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення наступних задач:

- побудова загальної блок-схеми експертної системи;
- проектування реляційної бази даних про експлуатаційні пошкодження конструктивних елементів ТЕС та розробки алгоритмів роботи з нею;
- формування методів та критеріїв, що лежать в основі блоку числового оцінювання допустимої глибини тріщиноподібних дефектів та формалізація прийомів роботи з ним;
- наведення прикладу результатів оцінювання ризику руйнування конструктивних елементів ТЕС.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання ризику руйнування експлуатованих елементів відповідальних елементів теплоенергетичного устаткування.

#### Виклад основного матеріалу

Відзначимо, що всі експертні системи мають спільну структуру [17], блок-схема якої показана на рис. 1. Однак часто розробляють їхні спеціалізовані версії для технічного діагностування певного типу конструкцій, які експлуатуються у специфічних умовах. Саме такою є розроблена нами спільно з фахівцями Державного науково-дослідного інституту теплоенергетики (ДНДІТЕ) Мінпаливенерго України [9, 11] експертна комп'ютерна система для технічної діагностики працездатності основних конструктивних елементів пароводяного тракту ТЕС. Такого типу системи призначені для оцінювання міцності та ризику руйнування експлуатованих елементів відповідальних конструкцій, встановлення термінів їх безаварійної роботи між двома черговими профілактичними оглядами, а також для аналізу причин їх руйнувань як результату розвитку наявних пошкоджень та тріщиноподібних дефектів [13, 16].

Інтерфейс користувача експертної системи технічної діагностики працездатності основних конструктивних елементів пароводяного тракту ТЕС побудований у вигляді комп'ютерної програми із зручним для користувача доступом до всіх інструментів і засобів, закладених у системі [18].

Експертна система містить відповідну реляційну базу даних експлуатаційних пошкоджень таких конструктивних елементів пароводяного тракту енергоблоків ТЕС [11]:

- екранних труб парових котлів;
- труб пароперегрівачів;
- водяних економайзерів, необігрівних котельних елементів;

– трубопроводів живильної води.

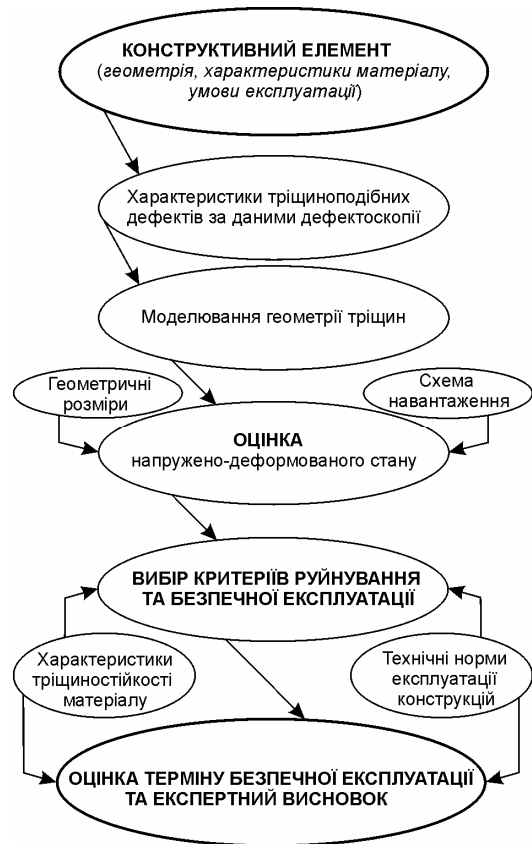


Рисунок 1 – Блок-схема експертної системи

Вона дає можливість впорядковано зберігати дані, а також здійснювати пошук необхідної інформації:

- за ключовими словами, що характеризують тип пошкодження чи руйнування;
- за назвою конструктивного елемента;
- за назвою ТЕС.

Розроблена база даних є автономною частиною експертної системи технічного діагностування працездатності основних конструктивних елементів пароводяного тракту. Усі дані зберігаються в стандартних форматах баз даних – DBase, Paradox, FoxPro. Доступ до бази забезпечує стандартний BDE-драйвер.

Фактично дані самої експертної системи чітко відділені від виконавчих файлів, файлів налаштувань та локальних даних. По суті, програма є своєрідною спеціалізованою математично-інтерфейсною оболонкою для роботи з базами даних. Це дає можливість залежно від завдань, об'єму та специфіки даних вибирати індивідуальний стиль роботи з експертною системою, наприклад: постійно працювати з одним набором даних або ж за

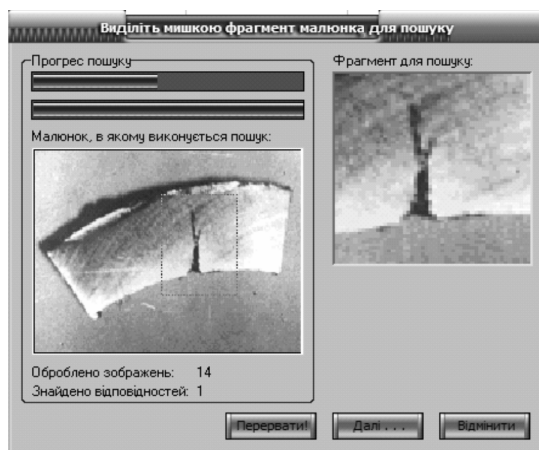
певними параметрами розділяти облік на декілька баз даних.

Пошук у базі здійснюють засобами драйвера баз даних, що забезпечує максимальну швидкість та пришвидшує процедури пошуку за складними критеріями чи повторний пошук. Для цього під час першого пошуку в базі створюється окремий файл індексації. Всі локальні дані – параметри станцій, конструктивні елементи та матеріали конструкцій також зберігаються в типізованих таблицях бази даних.

Серед особливостей роботи програми з базою даних слід виділити можливості експорту чи імпорту бази в інші формати (в т. ч. текстовий), що забезпечує можливість архівування та роботи з даними інших програм.

У цій розробці реалізований пошук як за текстовими полями (можна за декількома одночасно), так і за зображеннями дефектів або їх частин. Для пошуку тексту або його частини в діалоговому вікні слід ввести текст для пошуку та відмітити поля у яких слід проводити пошук.

Для пошуку за зображеннями дефекту або його фрагмента в діалоговому вікні слід відкрити зображення та виділити на ньому необхідний фрагмент. Пошук може виконуватись у всіх зображеннях пошкоджень збережених у базі даних (рис. 2).



**Рисунок 2 – Вікно пошуку та автоматичного аналізу зображень дефектів**

Програма дозволяє автоматизовано оцінювати розміри дефектів/тріщин на зображеннях, а також дає можливість виконати ці операції вручну. Вона передбачає аналіз як окремих вибраних зображень, так і роботу в режимі майстра, коли відбувається пошук усіх неоцінених фотографій та в діалоговому вікні пропонується по-черзі ввести параметри дефекту. Режим майстра буде корисним для

випадку, коли додавання зображень у базу даних здійснюється з одного місця (наприклад, передачею даних безпосередньо з місця діагностики), а аналіз даних відбувається на стаціонарній системі у спеціалізованій лабораторії.

Визначити геометричні параметри тріщиноподібних дефектів, які виникають на поверхні конструкцій, доволі складно, оскільки цей процес зводиться до аналізу не завжди якісного графічного зображення дефекту, отриманого під час фотографування поверхні конструкції, що містить ці дефекти. Оскільки аналіз причин руйнувань, як результату зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів, має динамічний характер, то попередній аналіз графічних зображень виконують, оцінюючи показники якості декількох графічних зображень одного і того ж дефекту, який розвивається в часі. При цьому, на процес фотографування тріщиноподібного дефекту в різні моменти часу накладається ряд вимог: важливо, щоб він відбувався за однакових умов, що впливає на якість зображень та результати їхнього подальшого аналізу. Показниками, за якими можна контролювати умови фотографування, можуть бути середнє значення яскравості  $M$  та дисперсія  $D$ . Якщо значення середньої яскравості та дисперсії зображення тріщиноподібного дефекту, який розвинувся за час  $\Delta T$ , суттєво відрізняються від середнього значення та дисперсії зображення того ж дефекту, але отриманого раніше, то приймають рішення про вживання відповідних заходів, які зменшать цю різницю (повторно фотографують поверхню конструкції, що містить дефект за інших значень освітленості, різкості тощо). Такі маніпуляції дають можливість отримати якісніше зображення, а отже поліпшити кінцевий результат розрахунків.

Після збереження у базі даних зображення до нього можна застосовувати весь наявний у системі арсенал інструментів. Першим кроком буде попередня обробка отриманого зображення. Сюди входить цілий ряд різноманітних алгоритмів, які дозволяють покращити вхідне зображення, підкресливши в ньому найбільш важливі інформативні ділянки. Кінцевим результатом повинно бути перетворене повноколірне чи напівтонове зображення в таке, що містить ділянки, які відображатимуться чорним або білим. Такі ділянки відповідатимуть індивідуальним „однорідним” областям зображення (наприклад: область дефекту чорним, область основного матеріалу – білим), які пізніше будуть

класифікуватися та параметри яких будуть визначатися додатковими алгоритмами.

На рис. 3 показано схему визначення геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів, яка реалізовується за допомогою розробленої системи.



**Рисунок 3 – Структурна схема процесу визначення геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів**

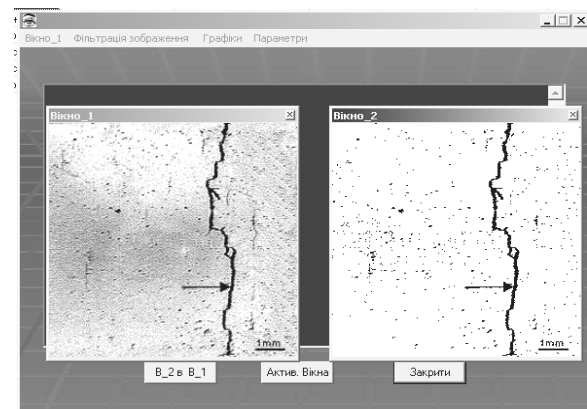
На першому етапі поверхню конструкції, що містить тріщиноподібний дефект, фотографують, на другому, попередньо аналізуючи якість отриманого зображення, визначають чи підходить воно для подальшої роботи. У випадку незадовільного результату повторно фотографують поверхню, враховуючи ті чинники, які дають можливість поліпшити зображення (наприклад, зміна освітленості, фокусування об'єктива). Третім етапом є попередня обробка зображення, на якому шляхом застосування алгоритмів фільтрації, підвищення чіткості, вирівнювання гістограми тощо перетворюють вхідне зображення, підкреслюючи на ньому найбільш важливі для подальшого аналізу елементи. На цьому етапі виконується і процедура бінаризації – класифікації елементів зображення на два рівні: чорне/біле. При цьому важливу роль відіграє процедура визначення та корекції тих ділянок вхідного зображення, яскравість яких така сама, як і ділянок, з яких складається тріщиноподібний дефект. Справа в тому, що під час фотографування поверхня з дефектом освітлюється неоднаково, окрім цього неоднаковим є і відбивання світла різними

ділянками матеріалу. Деякі з них будуть більш полірованими (характеризуватимуться так званим дзеркальним відбиттям), інші – більш шершавими (дифузне відбиття). У результаті на зображенні можуть з'являтися ділянки, які можна сприйняти як тріщиноподібний дефект. Дана проблема вирішується шляхом застосування ряду алгоритмів фільтрації зображення: медіанної, морфологічної, виділення на основі моделі зв'язності тощо.

За незадовільного результату роботи третього етапу вхідне зображення обробляють повторно, застосовуючи інші комбінації фільтрів та методів побудови бінарного зображення з іншими значеннями параметрів алгоритмів.

Останній п'ятий етап є завершальним і результатом його роботи є кількісні значення таких геометричних параметрів виділених компонентів зображення, як: площа, периметр, віддаль між двома найвіддаленішими точками периметра, діаметр.

Кожну з описаних процедур процесу визначення геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів реалізовує відповідна підпрограма експертної системи. Наприклад, на рис. 4 зображено головне вікно програми попереднього аналізу вхідних зображень та два робочих вікна: у вікні 1 присутнє вхідне зображення поверхні конструкції, що містить тріщиноподібний дефект, а у вікні 2 – зображення, отримане після бінаризації з порогом яскравості 168 без застосування коректуючих та фільтруючих алгоритмів.



**Рисунок 4 – Бінаризація вхідного зображення за заданим порогом яскравості**

Отримане зображення проходить подальшу обробку. Зокрема, програма дає можливість виконувати медіанну фільтрацію, логічну фільтрацію (видалення шумів на основі заданого порога по площі з використанням різних

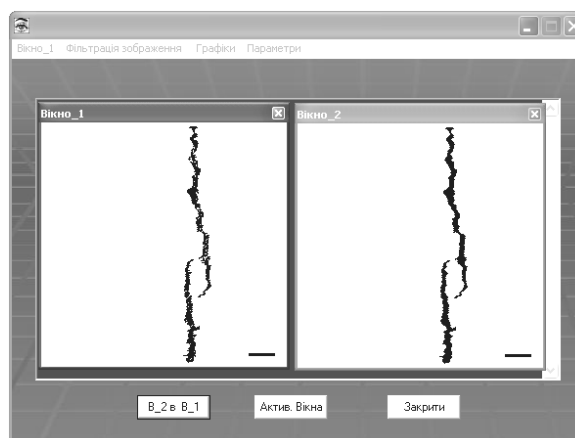
моделей зв'язності). Для боротьби з шумами типу „вибивання” та „налипання” використовують морфологічні операції: замикання („open”), розмикання („close”), ерозія та нарощування за перевагою („majority”). Так на рис. 5 у вікні 1 представлено зображення, отримане після логічної фільтрації із заданим порогом по площі рівним 80 пікселів (всі об'єкти, які мають площу менше 80 пікселів, сприймаються як шум і видаляються), а у вікні 2 – зображення, отримане після операції замикання, що дозволяє позбутися білих шумових компонент у області, яка відповідає аналізованому дефекту.

На етапі визначення геометричних параметрів аналізують всі об'єкти на відфільтрованому зображенні і визначають їхні площу, периметр, віддаль між двома найвіддаленішими точками периметра, висоту та ширину описаного прямокутника із виводом результатів в інформаційне вікно програми. На рис. 6 зображено головне вікно програми, що містить результати обрахунку, та допоміжне, в якому наведені автоматично виділені області дефектів.

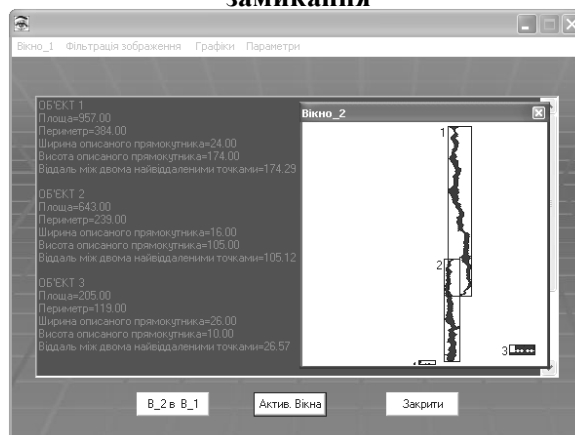
Зауважимо, що під час визначення геометричних параметрів, результати вимірювання, за замовчуванням, виводяться в пікселях, але, за необхідності, передбачено їх приведення до інших одиниць шляхом введення масштабного коефіцієнта.

Для аналізу динамічних змін (наприклад, відображення росту тріщини в часі) у програмі передбачено побудову графіка – залежності геометричних параметрів від номера профілактичного огляду. Оскільки між кожним профілактичним оглядом встановлюється задана кількість циклів навантаження, то, фактично, по осі абсцис отримуємо величину, пропорційну часу. Для прикладу, на рис. 7 показано залежність площі дефекту в пікселях від кількості профілактичних оглядів.

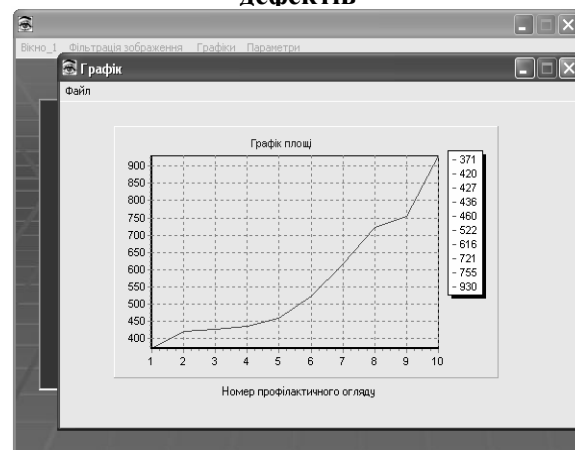
Найбільш важливою частиною системи, яка і дозволяє визначати стан елементів трубопроводів та робити прогнози щодо їхнього залишкового ресурсу є блок числового оцінювання допустимої глибини тріщиноподібних дефектів у стінках конструктивних елементів пароводяного тракту. У його основі лежать розроблені нами методи та критерії, які викладені у роботах [9–11, 15, 17]. Головне вікно інтерфейсу блоку зображено на рис. 8.



**Рисунок 5 – Логічна фільтрація та операція замикання**



**Рисунок 6 – Результати визначення геометричних параметрів тріщиноподібних дефектів**



**Рисунок 7 – Графік залежності площі тріщиноподібного дефекту від номера профілактичного огляду**

За допомогою даного інструменту стан будь-якого вибраного конструктивного елемента пароводяного тракту можна оцінювати за

такими критеріями [10]:

- безпечної експлуатації за пороговою глибиною тріщини,
- експлуатації з прогнозованим розвитком дефектів,
- ризику катастрофічного руйнування.

При цьому змінними, значення яких буде враховуватися при обрахунках, можуть бути:

- фактичний стан металу на даній ТЕС,
- реальний склад робочого середовища,
- геометричні розміри конструктивного елемента,
- специфіка експлуатаційних навантажень,
- форма тріщиноподібного дефекту.

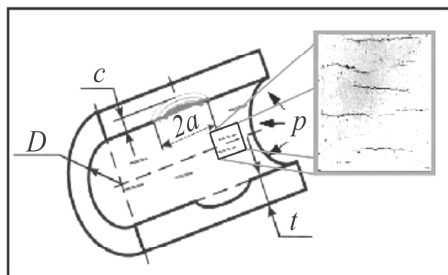
На основі розробленої комп'ютерної експертної системи технічної діагностики працездатності основних конструктивних елементів пароводяного тракту [17] було розроблено її спеціалізовану версію [9] – комп'ютерну експертну програму для технічної

діагностики працездатності основних конструктивних елементів та для запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенерувальних системах енергоблоків закритичного тиску ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії. Дана програма базується на тих самих компонентах основної системи, але є орієнтованою на зручне виконання вузького набору спеціалізованих задач.

Дана програма складається з кількох взаємопов'язаних блоків (вікон), які послідовно виконують поставлені користувачем завдання. У першому вікні програми здійснюється вибір трубопроводу з бази даних та задаються його параметри і критерії оцінювання виявлених тріщиноподібних дефектів. Тут вводять дані про контрольований об'єкт: номер енергоблоку ТЕС, ділянку трубопроводу та його геометричні розміри.



## ОЦІНКА РОБОТОЗДАТНОСТІ ТА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ З ТРІЩИНОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ



### Параметри трубопроводу

Товщина стінки труби ( $t$ ), м

Зовнішній діаметр труби ( $D$ ), м

Робочий тиск середовища ( $p$ ), МПа

Форма дефекту ( $c/a$ )  0,01 ... 0,8

Коефіцієнт овальності  0,8 ... 1

### Критерії оцінки тріщиноподібних дефектів

За пороговою глибиною тріщини,  $K_{th}$ , МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>

За граничною швидкістю росту,  $K^*$ , МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>

За ризиком крихкого руйнування,  $K_{fc}$ , МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>

### Характеристичні значення глибини тріщини

Порогова глибина тріщини  $c_{th}$ , мм

Глибина тріщини  $c^*$ , мм   
при  $(dc/dN)^* = 10^{-4}$  мм/цикл

Критична глибина тріщини  $c_{fc}$ , мм

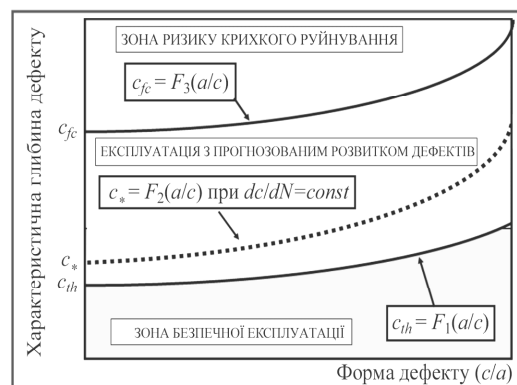


Рисунок 8 – Головне вікно блока числової оцінки допустимої глибини тріщиноподібних дефектів у стінках конструктивних елементів пароводяного тракту



Зображення тріщиноподібних дефектів, виявлених під час діагностичного огляду трубопроводу, вносять у відповідну базу даних. Там здійснюється апроксимація [11] кожного дефекту еквівалентною півеліптичною тріщиною зі співвідношенням півосей  $(c/a)_i$ . У кінцевому результаті дефектність трубопроводу описують сукупністю півеліптичних тріщин із розмірами  $(c/a)_i$ .

Ці дані програма використовує для експертного розрахункового оцінювання працездатності розглядуваного дефектного трубопроводу. Слід зауважити, що, відповідно до термінів діагностичних оглядів трубопроводів, база даних тріщиноподібних дефектів постійно доповнюється і, таким чином, програма та її оператор мають доступ до всіх результатів спостереження за ділянкою трубопроводу протягом терміну його експлуатації, що дозволяє відслідковувати зміни та аналізувати весь процес деградації

трубопроводу, значно підвищуючи точність експертних заключень про його залишковий ресурс.

Розрахунковий блок програми також використовує методи та критерії, які представлені нами у [9–11, 15, 17]. Розрахункове вікно (рис. 9) багатофункціональне. Тут можна коригувати параметри трубопроводу: товщину стінки, зовнішній діаметр, тиск середовища та коефіцієнт овальності, який визначає розташування дефекту (прямолинійна ділянка або згин). Також тут задаються вручну або вибираються з вбудованої бази експертної системи критерії. Це стосується всіх критеріїв, за якими розраховують допустиму чи критичну глибину дефекту, а також ту, яка дає можливість оцінити, на якій стадії необхідні оглядові роботи на об'єкті. Після встановлення всіх необхідних значень параметрів запускається розрахунок стану елементу трубопроводу згідно обраних критеріїв.

## ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ТА РОБОТОЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРУБОПРОВІДІВ ТЕС ЗА ПРИСУТНОСТІ ТЕХНОГЕННИХ ОРГАНІЧНИХ ДОМІШОК У ТЕПЛОНОСІЇ

### ТЕС „Л”. Перевірка програми

#### Параметри трубопр

Товщина стінки труби (t), м

Зовнішній діаметр труби (D), м

Робочий тиск середовища (p), МПа

Коефіцієнт овальності

Система "матеріал-середовище"

Константи системи "матеріал-середовище"

☒ вибрати з бази матеріал:

середовище:

n= 4.56 C(мм)=1.83E-10

☐ ввести числа

швидкість росту тріщини (мм/цикл)

Обчислити Закрити

#### Критерії оцінки тріщиноподібних дефектів

За пороговою глибиною тріщини,  $K_{th}$ , МПа<sup>1/2</sup>

За граничною швидкістю росту,  $K^*$ , МПа<sup>1/2</sup>

За ризиком крихкого руйнування,  $K_{IC}$ , МПа<sup>1/2</sup>

#### Характеристичні значення глибини тріщини

Порогова глибина тріщини  $c_{th}$ , мм

Глибина тріщини  $c^*$ , мм

при  $(dc/dN)^*=10^{-7}$  мм/цикл

Критична глибина тріщини  $c_{fc}$ , мм

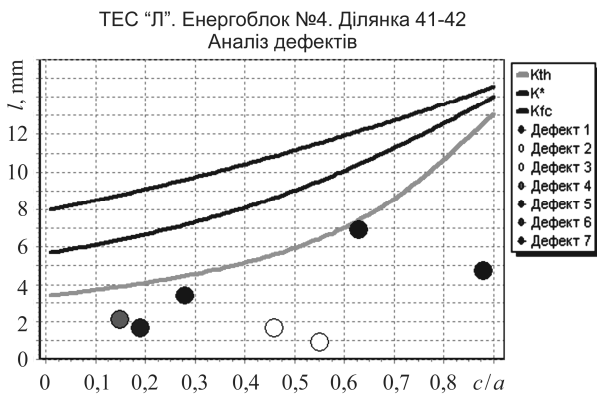
#### Дефект:

Глибина дефекту (C), мм:

Форма дефекту (c/a)  0.01 ... 0.9

Рисунок 9 – Головне розрахункове вікно програми

Слід зауважити, що система оцінює як глибину одичного дефекту, тобто на виході одержимо порогову глибину дефекту  $c_{th}$ , глибину дефекту  $c_*$  за деякої фіксованої швидкості його росту  $dc/dN = 10^{-m}$  мм/цикл і критичну його глибину  $c_{fc}$ , так і потенційну небезпеку сукупності дефектів, виявлених на об'єкті. Для кожного контрольованого трубопроводу і заданих умов його експлуатації програма розраховує відповідну діаграму оцінювання працездатності та ризику його руйнування [11, 15]. На діаграму автоматично наносяться точки, що відповідають виявленим дефектам, які розглядаються як сукупність півеліптичних тріщин розмірами  $(c/a)_i$ . Криві діаграми визначають зони безпечної експлуатації, експлуатації з контрольованим ростом дефекту, експлуатації з підвищеною частотою моніторингу, зону ризику крихкого руйнування, коли експлуатація повинна бути зупинена. Залежно від зони, в яку попадає кожен дефект, можна визначати його потенційну небезпеку та оцінити можливість подальшої експлуатації трубопроводу. Підсумкова діаграма (рис. 10) є основою для кінцевого експертного висновку про працездатність та потенційний ризик руйнування аналізованого трубопроводу.



**Рисунок 10 – Приклад результатів оцінки працездатності трубопроводу за аналізом виявлених дефектів**

## ВИСНОВКИ

Розроблена експертна система оцінювання ризику руйнування конструктивних елементів ТЕС. Система призначена для оцінювання міцності та ризику руйнування експлуатованих елементів відповідальних конструкцій, встановлення термінів їх безаварійної роботи між двома черговими профілактичними оглядами, а також для аналізу причин їх руйнувань як результату розвитку наявних

пошкоджень та тріщиноподібних дефектів.

Базуючись на сучасних підходах механіки деформівного твердого тіла, механіки руйнування матеріалів, система дає можливість робити експертні висновки про ризик руйнування, а також безпечну експлуатацію дефектного елемента трубопроводу на основі диференційованого оцінювання розмірів допустимих дефектів залежно від фактичного стану матеріалу, реального складу робочого середовища та геометричних розмірів конструктивного елемента, специфіки експлуатаційних навантажень і форми та параметрів дефектів.

Запропонована система може бути використана в інженерно-технічних та виробничих підрозділах електрогенеруючих компаній, а також в інших структурах, які здійснюють експлуатацію та технічну діагностику трубопровідних систем.

1. Антикайн П.А. Обеспечение надежной эксплуатации котлов, сосудов и трубопроводов после истечения проектного срока эксплуатации / П.А. Антикайн // Теплоэнергетика. – 1996. – № 12. – С. 2–7. 2. Система стандартов безопасности труда. Основные положения: ГОСТ 12.0.001-82. 3. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения: ГОСТ 12.0.002-80. 4. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.0.002-89. 5. Положение о системе технического диагностирования паровых и водогрейных котлов промышленной энергетики. – М.: МГП ДИЭКС, 1993. 6. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций: РД 34.17.421-92. – М.: СПО ОРГРЭС, 1992. 7. Дополнения и изменения к „Типовой инструкции по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций”: РД 34.17.421-92. – М.: СПО ОРГРЭС, 1994. 8. Вайнман А. Современное состояние проблемы коррозии металла пароводяного тракта энергоблоков СКД ТЭС Украины / Аркадий Вайнман // Проблемы коррозии та протикорозійного захисту матеріалів (Коррозія-2002): у 2-х т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 3. – Т. 1. – С. 44–50. 9. Дмитрах І. М. Оцінка ризику руйнування та запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенеруючих системах енергоблоків ТЕС за присутності техногенних органічних домішок у теплоносії / І.М. Дмитрах, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк, О.Д. Сміян,

Р.А. Барна, Б.П. Русин, Ю.В. Обух // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007-2009 рр. / наук. кер. Б.Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2009. – С. 109–114. 10. Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 1999. – 341 с. 11. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. [Т. 7]: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Том: [за ред. І.М. Дмитраха]. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с. 12. Akid R. Fatigue Damage Accumulation: the role of corrosion on the early stages of crack growth / R. Akid, I.M. Dmytrakh, J. Gonzalez-Sanchez // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2006. – V. 41, № 4. – P. 328–335. 13. Dmytrakh I. M., Electrochemistry of deformed smooth surfaces and short corrosion fatigue crack growth behaviour / Dmytrakh I.M., Akid R., Miller K.J. // British Corrosion Journal. – 1997. – V. 32, Is. 2. – P. 138–144. 13. Панасюк В.В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів / В.В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с. 14. Dmytrakh I. Diagrams for structural integrity assessment of heat-and-power-engineering pipelines with corrosion fatigue defects / I. Dmytrakh, O. Bilyy,

R. Barna // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: 4-та міжнар. наук-техн. конф., 23-27 черв. 2009 р.: зб. праць під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2009. – С. 747–756. 15. Akid R. Influence of surface deformation and electrochemical variables on corrosion and corrosion fatigue crack development / R. Akid, I.M. Dmytrakh // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1998. – V. 21, Is. 7. – P. 903–911. 16. Дмитрах І. М. Створення сучасних методів технічної діагностики працездатності систем пароводяного тракту енергоблоків ТЕС / І.М. Дмитрах, А.М. Сиротюк, Б.П. Русин, Ю.В. Лисак, А.Б. Вайнман // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. / наук. кер. Б.Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2006. – С. 128–132. 17. Кісіль Б.В. Система обробки, розпізнавання та аналізу зображень просторової структури матеріалів / Б.В. Кісіль, Б.П. Русин // Відбір і обробка інформації. – 2001. – Вип. 15. – С. 164–173.

**Поступила в редакцію 23.10.2013р.**

**Рекомендували до друку докт. техн. наук, проф. Горбійчук М. І. та докт. техн. наук, проф. Джала Р. І.**